三频段太阳射电望远镜与空间天气

耿立红[1]，谭程明[1]，敦金平[2]，章宏[3]，贾彦辉[4]，颜毅华[1]，
陈志军[1]，马素丽[1,5]，刘东浩[1]，杜静[1]，苏仓[1]
（1.中国科学院太阳活动重点实验室(国家天文台),北京,100101;2.中国气象局空间天气重点开放实验室,国家空间天气监测预警中心，北京，100081；3.中国电子科技集团第十六研究所,合肥,安徽,230043;4.中国电子科技集团第五十四研究所,石家庄,河北,050081;5.中国石油大学,青岛,山东，266580）

摘要：基于地基望远镜，对太阳射电辐射流量进行长期监测是空间天气预报的一个重要手段，用来预报太阳活动引发的地球上的各种扰动。明安图和塔什库尔干两台新的三频段（10.7cm，6.6cm 和 3.3cm）太阳射电望远镜将服务于我国的空间天气监测和预报，介绍了系统结构和设计特性、双噪声源定标方法。系统稳定性优于 1%（10 小时），灵敏度优于 1s.f.u。展示了明安图太阳射电望远镜 2017 年试观测初步结果。

关键词：太阳射电辐射流量；望远镜；$F_{10.7}$ 指数；定标；空间天气

中图分类号：P162.11　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：　1672-7673（2018）

基于地基望远镜，对太阳射电辐射流量进行长期监测是空间天气预报的一个重要手段，可预报太阳活动发生后在地球上产生的各种扰动。两台新建成的三频段太阳射电望远镜——明安图三频段太阳射电望远镜（Mingantu three bands Solar Telescope，MST)和塔什库尔干三频段太阳射电望远镜（Tashkurghan three bands Solar Telescope ，TST），将对太阳射电辐射流量长期监测发挥重要作用。高稳定性、高灵敏度、大动态范围以及可调时间分辨率设计，使这两台望远镜兼具太阳射电爆发观测和辐射流量监测的功能。

1.　太阳射电流量辐射与空间天气

太阳活动等自然现象导致日地空间状态发生的变化被称为“空间天气”，太阳活动是空间天气的主要驱动源。剧烈的空间天气变化可能造成空间天气灾害。越来越多的事实表明，一次空间天气灾害能在通信、导航、航空、航天、勘探及能源等各种技术层面同时产生系统的冲击，导致巨大的影响[1]。许多问题亟待研究和总体规划，如建设空间天气观测系统、应对空间天气灾害、评估恶劣空间天气事件影响、可靠预报和减轻空间天气影响等。

空间天气灾害监测需从太阳－行星际－磁层空间－电离层和中高层大气这一空间天气事件因果链上进行[2]。太阳活动预报是空间天气预报中最重要的方面，主要包括太阳耀斑、日冕物质抛射、质子事件、太阳射电流量和高速太阳风等。某一波长处总的太阳射电辐射流量反映了日冕中某一层次的太阳活动水平。太阳射电辐射流量与黑子相对数、耀斑爆发、X 射线爆发以及高能电子质子事件均有一定的关系，以 2840 MHz（波长 10.7cm）最为显著。10.7cm 太阳射电流量（$F_{10.7}$）单位为“太阳射电辐射流量单位”（sfu），宁静太阳射电辐射流量约在 50-500。自 20 世纪 60 年代 $F_{10.7}$ 一直被作为太阳活动指数，是太阳活动预报的主要参数。

对宁静太阳射电辐射的研究，结合光学资料，可以建立更精确的太阳大气（色球和日冕）模型。太阳缓变射电流量密度与黑子和谱斑面积有很好的统计关系。太阳缓变射电源的高度和尺寸通常随着波长的增加而增加，流量密度也随波长而变化。观测发现，缓变射电的频谱峰值出现于 5-20cm 频段，具体位置随太阳活动性的增强（如黑子磁场的增强）而变化。在多种波长对太阳缓变射电辐射作同步观测，可监测活动区上空不同层次的太阳大气的物理状态（如电子密度、电子温度等）。通常，太阳爆发与太阳黑子的大量出现分不开。$F_{10.7}$ 与太阳黑子数有较好的线性关系。太阳风暴发生在太阳射电流量较高的时段，太阳风暴爆发之前的 1-2 天，太阳射电流量会突然增加，射电能谱特性也会发生明显变化。

太阳紫外辐射影响地球高层大气密度，而高层大气密度变化对航天器产生曳力效应，影响卫星轨道。即，大气层曳力与太阳紫外辐射通量密切相关，目前大多数曳力模式以 $F_{10.7}$ 代表太阳紫外辐射通量。地球高层大气也有十分明显的 11 年周期的长期变化特征，对长期飞行的航天器轨道和寿命产生严重影响[3]。

基金项目：国家空间天气监测预警中心（国家卫星气象中心）项目（ZQC-H15080）；国家重大科研装备研制项目（ZDYZ2009-3）资助.

收稿日期：2018-01-16；修订日期：2018-02-11

作者：耿立红 ，女 ，高级工程师 .研究方向：射电天文技术与方法. Email：genglh@nao.cas.cn

总之，太阳射电流量是最有用的太阳活动和太阳紫外辐射爆发的指示器，表征着太阳活动的总体水平。

2. 三频段太阳射电望远镜 MST 和 TST

至今国际上依然有大量单天线的点频或多频太阳射电流量观测系统在运行，如加拿大 Ottawa/penticton 2800MHz 系统，自 1947 年 2 月开始常规观测至今，日均太阳流量密度是国际公认的太阳活动指标，绝对精度优于 5%，数十年相对稳定性优于 2%。日本野边山天文台的 1.0、2.0、3.75、9.4、17、35、80GHz 共 7 个单频偏振计，是国际公认太阳射电流量谱标准点。美国空军全球太阳射电监测网（RSTN），由 4 个站 LEAR（无 35GHz）、PALE、SGMR 和 SVTO 组成 24 小时不间断观测，0.245、0.41、0.606、1.415、2.695、4.995、8.8、15.4、35GHz9 个频点。瑞士伯尔尼大学应用物理研究所的系统在 8 个频点上进行观测，包括 3.2、5.2、8.4、11.8、19.6、35.0、50.0 和 92.5GHz。还有国家天文台 2840MHz 系统，自 20 世纪 70 年代开始常规观测。

但是，过去国内在空间天气预报方面 $F_{10.7}$ 指数更多依赖国外监测数据，获得信息时间滞后且信息量有限，每天只有一个时间点的数据。塔什库尔干三频段太阳射电望远镜，是中国气象局国家空间天气监测预警中心在全国范围内用于空间天气预报业务的地基太阳观测系统总体规划的一部分，由中国科学院国家天文台总体负责，以发展我国空间天气综合的无缝隙的探测业务。

综合考虑维护、气候和太阳观测条件，在塔什库尔干和国家天文台内蒙古明安图观测基地，各建设完成 1 台三频段 2801MHz/ 4542MHz/ 9084MHz（波长 10.7cm、6.6 cm 和 3.3 cm）太阳射电望远镜（TST，位置：37.78°N, 75.23°E,3091m H；MST，位置：42.22°N, 115.24°E,1356m H），见图 1。两台望远镜横贯中国东西，相距约 5000 千米，时差约 2 小时 40 分钟，能提供更长太阳观测时间覆盖。观测结果可以互相验证和补充，经定标后，将及时传送到中国气象局国家空间天气预警中心，为太阳活动预报和太阳风暴事件的实时警报提供及时可靠的第一手数据。



图 1 (左) 明安图三频段太阳射电望远镜 MST; (右)塔什库尔干三频段太阳射电望远镜 TST

Fig.1 (left) Mingantu Three Bands Solar Telescope -MST; (right) Tashkurghan Three Bands Solar Telescope-TST

TST 建在塔什库尔干县城中心附近的气象局内，电磁环境给其三频段太阳射电观测带来很大困难。随着国家“一带一路”战略的推进，塔什库尔干已成为“中巴经济走廊”在中国境内的重要节点，移动通信网络将发展很快，其东南、西南和西北方向又分别与巴基斯坦、阿富汗、塔吉克斯坦三国接壤，使 TST 电磁环境更加不容乐观，需考虑 TST 移址问题。国家天文台明安图观测基地则采用了多种无线电环境保护措施，离人口较为密集的明安图镇直线距离也在 20 千米以外，MST 电磁环境远好于 TST。

明安图射电频谱日像仪(Mingantu Spectral Radioheliograph, MUSER)位于明安图观测基地，是基于综合孔径原理，新一代同时具有高时间、高空间和高频谱分辨率的太阳专用成像观测设备[4]，2016 年 7 月通过验收，是国际上观测太阳活动的动力学性质、探测日冕大气、研究太阳物理的最新最有力武器之一。MUSER 分为高、低频两个阵列，其中 MUSER-II 工作在 2.0-15.0GHz 波段，由 60 面 2 米抛物面天线组成 3 螺旋阵列，常规观测模式为全频段扫频（中频带宽 400MHz）观测，时间分辨率为 206.25ms，而 MST 为 1ms。在 MUSER-II 高空间分辨率成像观测耀斑爆发等现象时，同地点 MST 的 3 频点双极化同时观测，利于观测数据的互相检验，并将可能提供该时间段内对应 3 个频段的太阳大气 3 个层次上高时间分辨率的更精细的演变过程。

3. 三频段太阳射电望远镜系统

3.1. 系统组成和性能

MST 和 TST 具有自动采集观测数据、分析处理、生成和传送符合气象业务规范要求的格式化数据产品，及系统标校和自检的功能，还具有较高可靠性、稳定性，能全天候长期连续运行，适应恶劣气候环境。系统组成

框图见图 2，并采用全球定位系统校时，UPS 提供备用电源。采用 3m 口径赤道式抛物面天线，效率优于 40%。宽带 90° 合成器将 Eleven 馈源接收的线极化信号转换为左、右旋圆极化信号，工作频段为 2801MHz, 4542MHz, 9084MHz，时间分辨率 1s、100ms 和 1ms，瞬时动态范围大于 30dB。三个频段半功率波束宽度分别为 150'，92' 和 46'，覆盖了全日面，指向精度优于工作波长 1/15，对日跟踪时，指向在计算机控制下每秒更新一次。

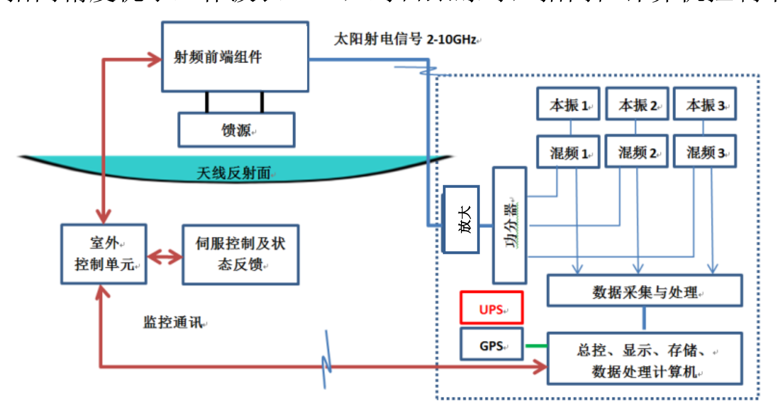


图 2 太阳射电望远镜系统组成框图

Fig.2 System Block Diagram of MST and TST

两个站址气候条件恶劣，为保障系统性能稳定和降低系统噪声，采用双路低噪声放大器，温度敏感的室外射频前端组件置于靠近馈源的高精度恒温箱内，这沿用了 MUSER 模拟室外前端方法[5]，并采用低损耗同轴电缆进行射频信号传输，增益起伏小于 1%/10 小时。室外接收前端可工作在-30℃~+60℃环境下，温度控制范围 10℃～40℃，可根据环境温度设定，经测试温控精度优于±0.05℃。图 3 为恒温室外前端内部装配示意图和实物图。

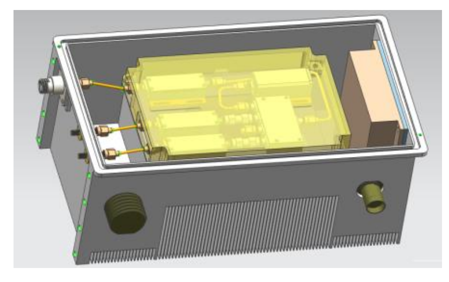



图 3 恒温室外前端内部装配示意图和实物图

Fig. 3 Configuration Diagram and Picture of Thermostatic RF Front End Box

单天线系统灵敏度公式：

$$\Delta S_{\min} = \frac{2R_{\min}kTs}{A\eta\sqrt{\tau\Delta f}}$$

其中，R_{min} 为最小可用信噪比，一般 $R_{min}=5$；波尔兹曼常数 $k=1.38*10^{-23}J/K$；接收天线几何面积 $A=\pi D^2/4$，$D=3m$；积分时间 $\tau=100ms$，积分带宽 $\Delta f=10MHz$，天线效率 $\eta=0.4$。

$T_s \approx (T_a+T_{sun})*b+T_0*(1-b)+T_{rec}$

T_a+T_{sun}：天线噪声（指向冷空）和宁静太阳辐射功率；b：从天线输出端到接收机输入端之间的传输系数；取 $T_a \approx 100K$，$2801MHz$ 处，$T_{sun}\approx 500K$，$b\approx 0.5$, $T_0=290K$；采用的双路限幅低噪声放大器在工作频带内的噪声系数经测量 $<2.5dB$。接收机系统噪声系数 $<3.0\ dB$，接收机系统噪声温度 $T_{rec}<290K$，$T_s\approx 735\ K$；从而得到系统灵敏度 $\Delta S_{min}\approx 0.36\ sfu$。MAT 和 TST 的相对灵敏度优于 1%，并具备探测几个 sfu 的小爆发的能力。

3.2. 用户友好界面

MAT 和 TST 操作界面友好美观，方便易操作，见图 4。主界面上显示系统结构，可以设置时间分辨率、选择数据存储磁盘，另可以通过上方按钮，进入系统设置和状态显示、天线控制和状态显示、实时功率显示等界面。界面简洁、一目了然，易于操作。自动观测模式下，系统自动按时启动和停止观测，并在停止后使天线处于收藏状态，同时可以查看系统状态和实时功率。天线控制界面可设置天线指向某一方向，可选择天线在赤经和赤纬两个轴向的转动方向和速度，也可使天线根据给定轨道自动跟踪目标。实时功率显示界面，放大和缩小两个轴向的显示尺度，并可任意选择显示 3 个频段，选择数据实时显示或当日数据回放显示。



图 4 太阳射电望远镜用户友好界面

Fig.4 User Friendly Interfaces of MST and TST

3.3. 定标

定标是确定接收机数值与信号强度的关系。只有经过定标，观测数据才有物理意义，才能与其它设备观测结果有可比性。射电太阳是一颗“变星”，太阳射电望远镜在各波段上的逐日定标是其观测流程中的重要一环[6] 。太阳射电望远镜定标方法[7-10] 有绝对定标、相对定标和非线性定标。相对定标较为常用，即利用已知标准源对原始数据进行定标。定标参数是频率、温度、考虑大气吸收时天顶距 Z 的函数。

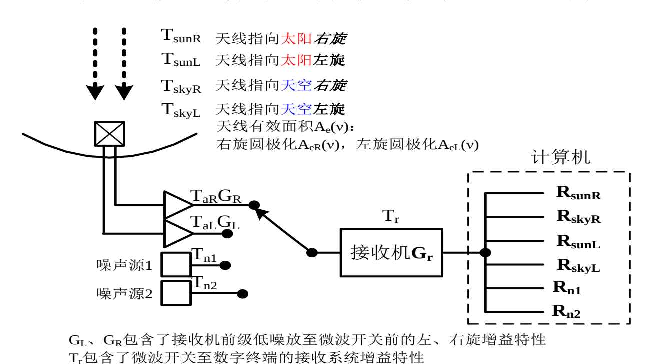


图 5 MST 和 TST 双噪声源定标的原理框图

Fig.5 diagram of calibration of MST and TST

（1）绝对定标

对于一个方向瓣较宽的天线，点源的流量密度可以表示为

$$S(\nu)=\frac{8\pi k_B}{\eta D_0 K\lambda^2}\cdot\Delta T_A\cdot e^{\tau_0\sec z}=\frac{8\pi k_B\cdot\Delta T_A}{G\lambda^2}$$

$S(\nu)$是点源在频率 ν 处的流量；k_B 为玻尔兹曼常量；D_0 为天线方向性系数；K 为天线方向图改正因子；τ_0 为大气吸收因子；z 为天顶距，而 $e^{\tau_0\sec(z)}$是大气改正因子，通常可近似为 1，天线增益 $G=\eta D_0$，ΔT_A 为天体（太阳）的天线温度增量。由于太阳的 ΔT_A 每天都有所变化，因而稳定而又可靠的 ΔT_A 的测量是绝对定标的先决条件[6]。要获得太阳的绝对流量密度，须通过实验测量得到天线增益及标准噪声源的值，然后由上述公式把天线温度增量转换成射电辐射流量。绝对定标使射电望远镜的观测结果不依赖于其它望远镜而成为一个独立系统。

（2）相对定标

MST 和 TST 初始设计也采用了 Tanaka 等人 70 年代系统阐述的定标方法，即利用已知噪声温度的噪声源、匹配负载、天空背景，确定太阳净射电辐射流量值：

$$\frac{R_{sun}-R_{sky}}{T_{sun}-T_{sky}}=\frac{R_n-R_t}{T_n-T_t}$$

从圆极化馈源输出的太阳左、右旋圆极化信号分别经过低噪声放大器，再接四选一微波开关的两个输入。微波开关的另外两个输入初始设计为超噪比为 15dB 的噪声源和 50ohm 的匹配负载。高的接收机系统后端噪声抬高了底噪，使微波开关切换到 50ohm 负载时，终端读数反映等效到微波开关前的接收机系统噪声。采用具有不同超噪比的双噪声源进行定标解决这个问题，即用 R_{n1}、R_{n2} 和 T_{n1}、T_{n2} 代替 R_n、R_t 和 T_n、T_t，见图 5。

由右旋宁静太阳和天空背景在终端的读数相减，得到扣除天空背景辐射后右旋宁静太阳射电辐射净流量：

$$R_{sunR}(\nu)=(T_{sunR}(\nu)\cdot G_R(\nu)+T_r(\nu))\cdot G_r(\nu)=(S_{sunR}(\nu)\cdot C_k\cdot A_{eR}(\nu)\cdot G_R(\nu)+T_r(\nu))\cdot G_r(\nu)$$

$$R_{skyR}(\nu)=(T_{skyR}(\nu)\cdot G_R(\nu)+T_r(\nu))\cdot G_r(\nu)=(S_{skyR}(\nu)\cdot C_k\cdot A_{eR}(\nu)\cdot G_R(\nu)+T_r(\nu))\cdot G_r(\nu)$$

$$R_{n1}(\nu)=(T_{n1}(\nu)+T_r(\nu))\cdot G_r(\nu)$$

$$R_{n2}(\nu)=(T_{n2}(\nu)+T_r(\nu))\cdot G_r(\nu)$$

由以上 4 式可得：

$$(S_{sunR}(\nu)-S_{skyR}(\nu))\cdot C_k\cdot A_{eR}(\nu)\cdot G_R(\nu)=(R_{sunR}(\nu)-R_{skyR}(\nu))\cdot\frac{T_{n1}(\nu)-T_{n2}(\nu)}{R_{n1}(\nu)-R_{n2}(\nu)} \quad (1)$$

设 $C_R(\nu)=C_k\cdot A_{eR}(\nu)\cdot G_R(\nu)$，（1）式成为：

$$(S_{sunR}(\nu)-S_{skyR}(\nu))\cdot C_R(\nu)=(R_{sunR}(\nu)-R_{skyR}(\nu))\cdot\frac{T_{n1}(\nu)-T_{n2}(\nu)}{R_{n1}(\nu)-R_{n2}(\nu)} \quad (2)$$

同理，得到扣除天空背景辐射后的左旋太阳射电辐射净流量：

$$(S_{sunL}(\nu)-S_{skyL}(\nu))\cdot C_L(\nu)=(R_{sunL}(\nu)-R_{skyL}(\nu))\cdot\frac{T_{n1}(\nu)-T_{n2}(\nu)}{R_{n1}(\nu)-R_{n2}(\nu)} \quad (3)$$

(2)、(3)式右端均为记录已知值。理想情况下，在观测宁静而没有黑子的太阳时，所得太阳辐射圆偏振应该为 0，即全日面宁静太阳辐射具有无圆偏振特性。但对宁静太阳实际观测时，左、右旋圆极化输出读数是不等的。可利用宁静太阳无圆偏振特性校准望远镜偏振接收特性。实际宁静太阳左、右旋射电辐射流量均应为该频段 1/2 太阳总射电辐射 $S_\Theta(\nu)$：

$$S_{sunR}(\nu)-S_{skyR}(\nu)=S_{\Theta R}(\nu)=S_{\Theta L}(\nu)=S_{sunL}(\nu)-S_{skyL}(\nu)=S_\Theta(\nu)/2 \quad (4)$$

其中，$S_\Theta(\nu)$ 采用观测当天国际标准太阳射电流量谱的值。一般情况下，并不能每日实时获得 $S_\Theta(\nu)$标准值。将已知一段时间的 $S_\Theta(\nu)$代入(2)、(3)式，可获得这段时间内 $C_R(\nu)$和 $C_L(\nu)$的一个正态分布，取其平均值作为左、右旋圆极化通道的校准系数 $C^*_R(\nu)$和 $C^*_L(\nu)$：

$$S_{sunR}(\nu)-S_{skyR}(\nu)=\frac{R_{sunR}(\nu)-R_{skyR}(\nu)}{C^*_R(\nu)}\cdot\frac{T_{n1}(\nu)-T_{n2}(\nu)}{R_{n1}(\nu)-R_{n2}(\nu)} \quad (5)$$

$$S_{sunL}(\nu)-S_{skyL}(\nu)=\frac{R_{sunL}(\nu)-R_{skyL}(\nu)}{C^*_L(\nu)}\cdot\frac{T_{n1}(\nu)-T_{n2}(\nu)}{R_{n1}(\nu)-R_{n2}(\nu)} \quad (6)$$

在接收机线性范围内，可对净太阳射电爆发流量左、右旋分量进行定标：

$$S_{burst-R}(\nu)-S_{skyR}(\nu)=\frac{R_{burst-R}(\nu)-R_{skyR}(\nu)}{C^*_R(\nu)}\cdot\frac{T_{n1}(\nu)-T_{n2}(\nu)}{R_{n1}(\nu)-R_{n2}(\nu)} \quad (7)$$

$$S_{burst-L}(\nu)-S_{skyL}(\nu)=\frac{R_{burst-L}(\nu)-R_{skyL}(\nu)}{C^*_L(\nu)}\cdot\frac{T_{n1}(\nu)-T_{n2}(\nu)}{R_{n1}(\nu)-R_{n2}(\nu)} \quad (8)$$

环境及大气参数变化会使定标系数产生短期起伏和周年变化。太阳活动峰年时每日定标精度会下降。MST 和 TST 的 3 个频段跨越了厘米-分米范围，大气吸收影响对 3 个频段是不同的。定标要求接收机必须有很好的线性[7]及稳定性。要得到精确可靠的定标系数，需较长时间的观测数据统计分析。

4. 初步结果

2016 年底，MST 和 TST 开始试观测。图 6 及表 1 为 2016 年 12 月 15 日 MST 与石岛及日本野边山类似太阳射电望远镜观测太阳结果进行比对，MST 系统稳定性优于 1%（10 小时）。太阳在爆发时，强烈的无线电信号导致观测结果标准偏差显著增大。即使在无黑子的宁静期，望远镜也会接收来自不同天体或天空背景的电磁信号。所以通过观测太阳得到系统的稳定性需要长期的监测数据分析。另外减少周围环境影响,是取得长期稳定性的一个重要保证。今后将对系统稳定性作长期测试，并进一步分析测试影响系统稳定性的因素。

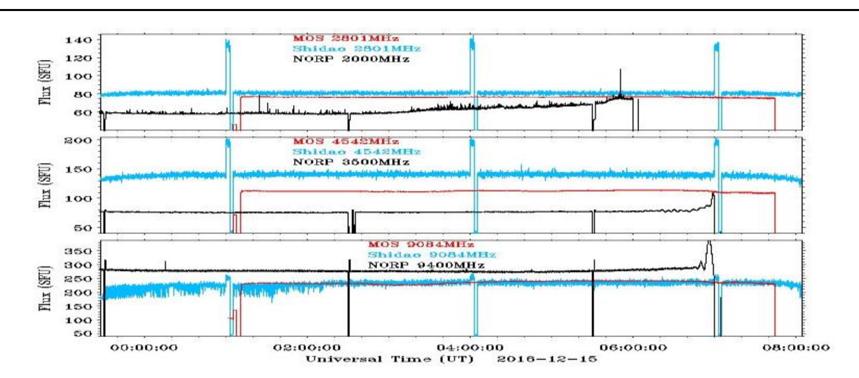


图 6 MST（红色）与类似的太阳射电望远镜-石岛（蓝色）及日本 NORP（黑色）观测比对

Fig.6 Preliminary result of MST on 3-band compared with those of similar solar radio telescopes in Shidao and in Nobeyama, Japan

表 1.（对应图 6）MST、石岛和日本 NORP 三台太阳射电望远镜观测值的相对标准偏差值

Table1 （referred to Figure6）Relative Standard Deviation of MST, Shidao Telescope and NORP

	中国-MST		中国-石岛		日本-NORP	
相对标准偏差	0.51%	2801MHz	0.88%	2801MHz	0.75%	2000MHz
相对标准偏差	1.01%	4542MHz	1.65%	4542MHz	2.38%	3500MHz
相对标准偏差	1.95%	9084MHz	2.75%	9084MHz	2.42%	9400MHz

系统稳定性通常是指接收机的稳定性。Allan 检验[11]是测量稳定性的最终方法，但需要大量的测量时间。本文通过测量接收机长期工作的增益起伏和信噪比得到接收机的稳定性，见图 7。表明接收机 16 个小时的增益起伏很小，信噪比大于 20dB。可认为接收机稳定性优于 1%。

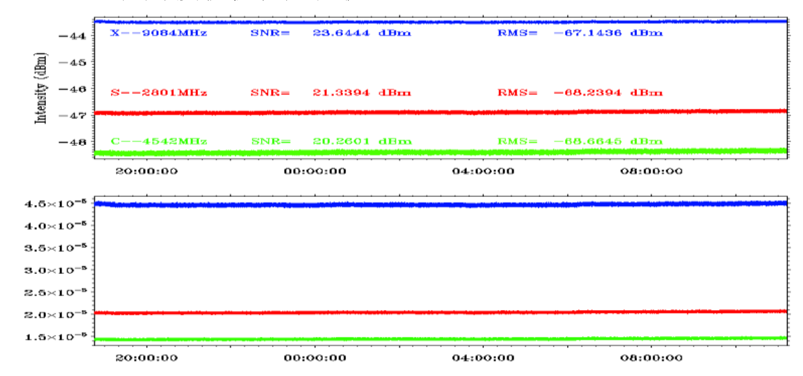


图 7 2016 年 11 月 30 日,接收机系统连续 16 个小时的稳定性监测

Fig.7 Stability monitoring of receiving system lasting 16 hours on Nov.30, 2016

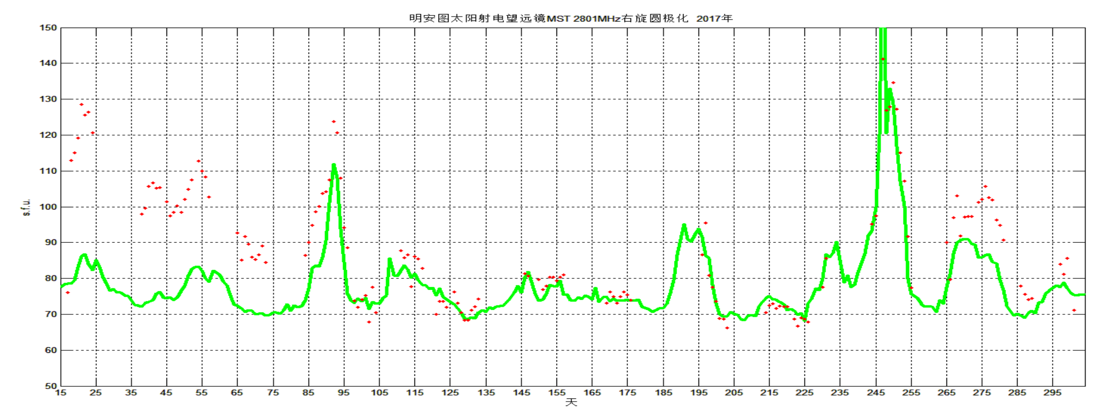


图 8 MST S 频段 2017 年 1-10 月太阳射电流量（红点）与加拿大 Penticton 数据（未考虑日地距离变化，绿线）比对

Fig.8 Solar flux data of MAT S-band in 201701-201710(red dot) compared with that of Penticton 2800 MHz Solar Flux (green line)

至 10 月 31 日，2017 年 MST 共有效观测太阳 148 天。图 8 为 MST 流量值（红点）与加拿大 2800 MHz Penticton①

①https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-features/solar-radio/noontime-flux/penticton/penticton_observed/tables/drao_noontime-flux-observed_2017.txt

（绿线）比对，MST 数据是先将毫秒级数据积分到秒，用正午 1 点（有爆发时避开）左右旋和 3 个频段太阳观测值分别减去当天背景，并乘以对应的校正系数得到的。2017 年 3 月初对 MST 天线、接收机及软件进一步调试，并实现观测自动化，调试前后系统状态有变化，这可能是图 8 中 MAT 和加拿大数据比对时 1 月和 2 月偏离较大的原因，系统状态随季节变化也会导致偏离[11]，这也是今后系统定标必须考虑的。2017 年 9 月太阳活动区 AR2673 引起一系列太阳爆发现象，北京时间 2017 年 9 月 6 日晚 20:02，太阳爆发了有史以来最耀眼的 X9.3 级耀斑。图 9 给出了 MST 在 9 月 1 日-12 日期间的观测，图 10 为 2017 年 9 月 6 日 MST X 频段观测结果的局部细节放大。

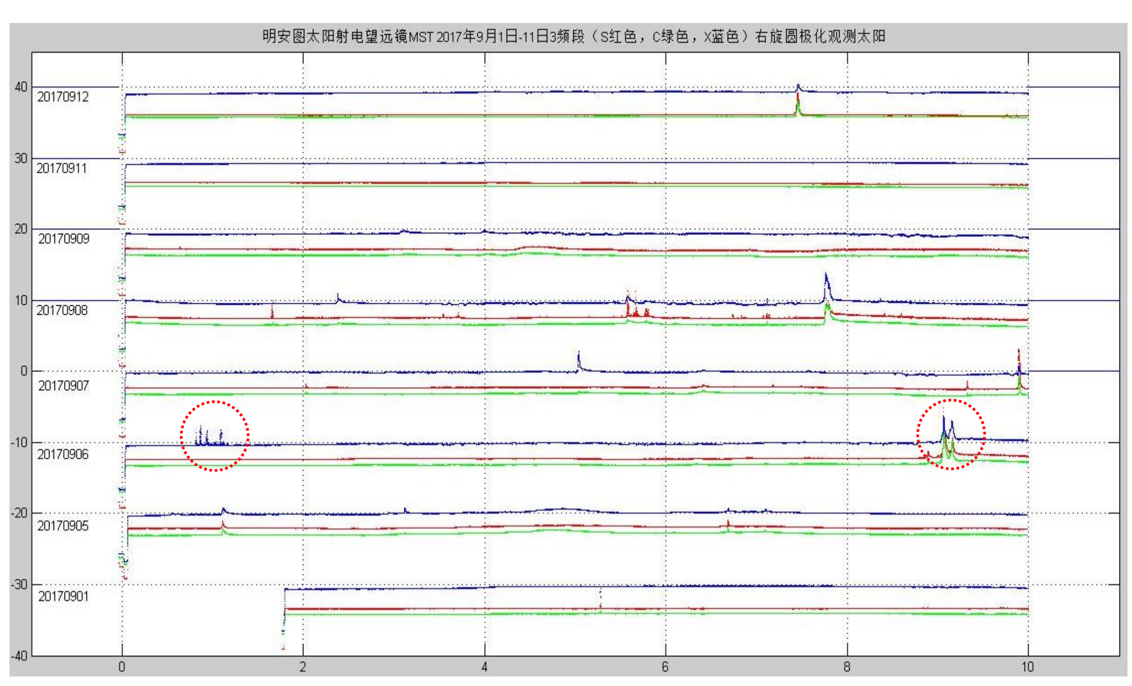
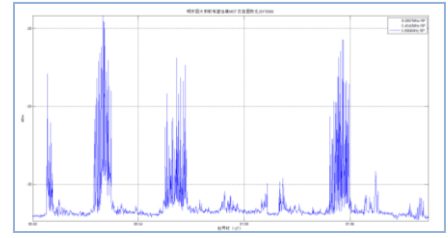


图 9 20170901-20170912 期间 MST 三频段右旋秒级观测太阳数据（横轴：世界时，纵轴：20170901 为基础逐日加 10dB）

Fig.9 MST 3-band right circular polarization data with 1s time resolution between 20170901 and 20170912 (X: UT, Y:10dB is added every day after 20170901)



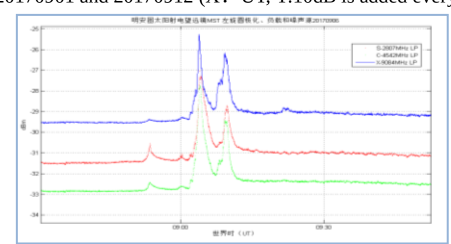


图 10 左：MST X 频段局部放大图(20170906 UT 0:48-1:12);右：MST X 频段局部放大图(20170906 UT 8:30-10:30)

Fig. 10 left: MST X-band enlarged drawing（20170906 UT 0:48-1:12); right: MST X-band enlarged drawing（20170906 UT 8:30-10:30）

5. 结论

两台三频段太阳射电望远镜已分别在国家天文台(内蒙古)明安图观测基地和新疆塔什库尔干建成。受电磁干扰困扰，TST 正在考虑迁址。MST 则已获得太阳流量数据，并观测到数次太阳爆发，表明高稳定性（优于 1%/10 小时）、高灵敏度（优于 1s.f.u）、大动态范围（30dB）以及可调时间分辨率设计，使望远镜兼具太阳射电爆发观测和辐射流量监测功能，当然观测结果还有待进一步鉴别。本文中首次设计采用双噪声源定标方法。2017 年底试观测基础上对 MST 再次进行了调试，系统运行更加稳定可靠，2018 年有望获得更多有效观测数据，以便在系统校准方面深入开展工作，今后并将对影响稳定性的因素作进一步分析和测试。

致谢：感谢支持和参与系统调试工作的中国电子科技集团第 16 所的黄文生、刘文齐、孙婷婷，中国电子科技集团第 54 研究所的耿京朝、武占为、张明，也向提出很好建议并参与系统观测等工作的国家天文台明安图观测基地的所有同事表示感谢。

参考文献：

1. 美国国家研究理事会恶劣空间天气事件对社会和经济影响委员会(工作组).恶劣空间天气事件[M].王劲松,张效信，译.北京:气象出版社,2011
2. 王劲松,焦维新.空间天气灾害[M].北京:气象出版社,2008.

3. 张效信,杜丹,郭建广.空间天气定量预报模式[M]. 北京:气象出版社,2016.
4. 颜毅华,张坚,陈志军,等.关于太阳厘米-分米波段频谱日像仪研究进展[J].天文研究与技术—国家天文台台刊，2006, 3(2):91-98.
   Yan Yihua ,Zhang Jian, Chen Zhijun, et al. Progress on Chinese solar radioheliograph in cm-dm wavebands[J].Astronomical Research & Technology—Publications of National Astronomical Observatories of China, 2006,3(2):91-98.
5. 耿立红,颜毅华,宋庆辉,等.明安图射电频谱日像仪高频阵模拟接收机研制[J].天文研究与技术,2016,13(2):160-169.
   Geng Lihong,Yan Yihua,Song Qinghui, et al. MUSER-II analog receiver system designing and developing[J].Astronomical Research & Technology, 2016,13(2):160-169.
6. 傅其骏,郑乐平,李小聪,等.厘米分米波段太阳射电的绝对定标与常规测量[J].天体物理学报，1982,2(3):191-200.
   Fu Qijun, Zheng Leping, Li Xiaocong, et.al. Absolute calibration of solar emission in centimeter band and daily calibration[J]. Acta Astrophysica Sinica,1982,2(3):191-200.
7. Tanaka H, Castelli J P, Covington AE, et.al. absolute calibration of solar radio flux density in the microwave region[J]. Solar Physics,1973, 29:243-262.
8. YanY H, Tan C M, Xu L.et. al. Nonlinear calibration and data processing of the solar radio burst [J]. Science in China Series A: Mathematics, 2002, 45 (s1):89-96.
9. Tan C M, Yan Y H, Tan B L, et al. Calibration of the solar radio spectrometer[J]. Science in China Series G: Physics, Mechanics and Astronomy, 2009, 52(11):1760 -1764.
10. Tan C M, Yan Y H, Tan B L, et al. Study of calibration of solar radio spectrometers and the quiet-sun radio emission[J]. The Astrophysical Journal, 2015,808:61(14PP).
11. Allan D W. Statistics of atomic frequency standards[J].Proceedings of the IEEE,1966,54(2): 221-230.

Two New 3-Bands Solar Radio Polarimeters and Spaceweather

Geng Lihong[1], Tan Chenming[1], Dun Jinping[2], Zhang Hong[3], Jia Yanhui[4], Yan Yihua[1],
Chen Zhijun[1], Ma Suli[1, 5], Liu Donghao[1], Du Jing[1], Su Cang[1]

(1. CAS Key Laboratory of Solar Activity（National Astronomic Observatories）,CAS,Beijing,100101,Email:genglh@nao.cas.cn; 2.Key Laboratory of Space Weather, National Center for Space Weather, China Meteorological Administration, Beijing, 100081,China;3.The 16th Research Institute of CETC, Hefei, China;4.The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang,050081,China;5.China University of Petroleum,Qingdao,266580,China)

Abstract: It is an important method of space weather predictor to monitor the solar flux continuously in long-term with the ground-based solar radio telescopes. Solar flux is one of the most useful observable indexes for predicting kinds of turbulence occurred on the earth excited by the sun activities and solar ultraviolet radiation. It represents the solar total activity level, especially the 10.7cm solar flux, which has long been used as solar activity index since 1960s. With the financial support of NSMC (National Satellite Meteorological Center) and NAOC (National Astronomical Observatories), two new 3-bands radio telescopes used to monitor the solar flux on three wavelengths（10.7cm, 6.6cm and 3.3cm）have been set up in 2016 December in Mingantu Observatory of NAOC in inner Mongolia province and in Tashkurghan in Xinjiang province. The two telescopes, named MST and TST separately, each consisting of a 3-m size diameter parabolic antenna, 2-10 GHz wide band two-polarization feed, a constant temperature front-end box, will give more time coverage to observe the sun with the distance between the two sites is about 5000km and 2.67 hours zone away. Constant temperature of the front-box helps to keep the system stability, especially in Mingantu and Tashkurghan the weather changes severely from hour to hour. After calibrated, data sets of fits format will be uploaded automatically everyday through the internet to the data reduction center of NSMC, used as space weather monitoring data. Double noise sources methods is first adopted in system calibration.The system stability is better than 1% in over 10 hours, system sensitivity is better than 1 s.f.u., with Δf=10MHz and Δt=0.1s. The electromagnetic environment of MAT is much better than that of TST. In 2017, MST has gotten some preliminary results. In 2018, more efficient data can be expected, and further work will be done in system calibration and system stability testing and analyzing.

Key words: solar radio flux; telescope; $F_{10.7}$ index; calibration; spaceweather